УДК 621.311

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОТТЯЖЕК ОПОР ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Палагушкин Борис Владимирович,
проректор по научной работе, д.т.н., ФГБОУ ВО «СГУВТ», Новосибирск, e-mail: kesbs@nsawt.ru
Дёмин Юрий Васильевич,
профессор, д.т.н., ФГБОУ ВО «СГУВТ», Новосибирск, e-mail: kesbs@nsawt.ru
Кузнецов Алексей Юрьевич,
старший преподаватель, к.т.н., ФГБОУ ВО «СГУВТ», Новосибирск, e-mail: kesbs@nsawt.ru
Полунин Михаил Андреевич,
доцент, к.т.н., ФГБОУ ВО «СГУВТ», Новосибирск, e-mail: kesbs@nsawt.ru
Шмаков Дмитрий Александрович,
аспирант, ФГБОУ ВО «СГУВТ», Новосибирск, e-mail: kesbs@nsawt.ru

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL ASSESSMENT OF GUYED POLES HIGH-VOLTAGE LINES OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

Palagushkin Boris Vladimirovich,
Vice-rector on Scientific Work, Doctor of Technical Sciences, FSFEI HE "SSUWT", Novosibirsk, e-mail: kesbs@nsawt.ru
Demin Yuri Vasil'evich,
Professor, Doctor of Technical Sciences, FSFEI HE "SSUWT", Novosibirsk, e-mail: kesbs@nsawt.ru
Kuznetsov Alexey Yur'evich,
Senior Lecturer, Candidate of Technical Sciences, FSFEI HE "SSUWT", Novosibirsk, e-mail: kesbs@nsawt.ru
Polunin Michael Andreevich,
Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, FSFEI HE "SSUWT", Novosibirsk, e-mail: kesbs@nsawt.ru
Shmakov Dmitriy Alexandrovich,
Graduate Student, FSFEI HE "SSUWT", Novosibirsk, e-mail: kesbs@nsawt.ru

Аннотация. Разработана математическая модель распространения поверхностных волн высокой частоты в системе «металл - диэлектрик - грунт», пригодная для расчета степени коррозии узла крепления оттяжек по параметрам возбужденной в нём электромагнитной волны и электрического сопротивления.
Abstract. The mathematical model of distribution of surface waves at high frequencies in the system "metal - dielectric - ground" suitable for calculation of the degree of corrosion of the attachment of the braces in the parameters of the excited therein by electromagnetic waves and electric resistance.
Ключевые слова. Математическая модель, поверхностная волна, коррозия узла крепления оттяжек опор.
Key words. Mathematical model of surface wave, the corrosion of the attachment of braces supports.

Метод определения сопротивления узла крепления оттяжек основан на использовании токов высокой частоты (скин-эффект), при которых продукты коррозии и грунт проявляют себя в качестве диэлектрика. Этот факт устраняет влияние грунта,

позволяет с достаточной точностью выделить и определить сопротивление поверхностного слоя металла.

Материал проводника характеризуется удельной проводимостью γ и магнитной проницаемостью μ. Предлагаемый метод позволяет оценить какая часть тока в проводнике сосредоточена в поверхностном объёме между радиусами «a» и «r», где «a» - радиус проводника без учета коррозии (начальный), а «r» - оставшийся после коррозии (рисунок 1).

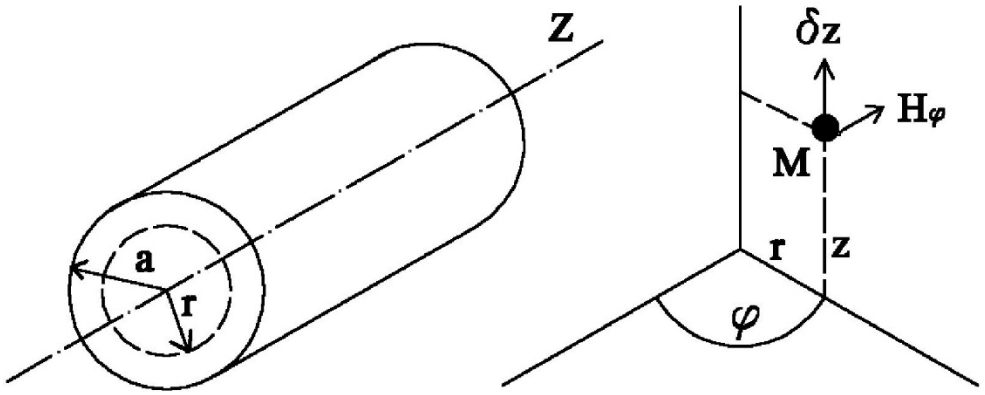


Рисунок 1, 2 – «a» - радиус проводника без учета коррозии (начальный), а «r» - оставшийся после коррозии. Продольная компонента δz плотности тока и угловая компонента Hφ напряжённости магнитного поля в цилиндрических координатах (r, φ, z) точки M

При расчёте использованы решения уравнений Максвелла с учётом осевой симметрии цилиндрического проводника. Поскольку в проводнике протекает синусоидальный ток, то зависимость векторов δ и H от времени может быть выражена комплексным множителем ejωt, где (ω - круговая частота, t – временной параметр, j=(-1)1/2):

$$\delta(r,t) = \delta(r)e^{j\omega t}, \quad H(r,t) = H(r)e^{j\omega t} . \qquad (1)$$

В силу осевой симметрии проводника учитывалась зависимость только от радиальной координаты – r, при этом имеют место следующие выражения

$$\text{rot } H = \delta, \quad \text{rot } \delta = - j\omega\gamma\mu H, \qquad (2)$$

откуда, при исключении вектора H, может быть получено соотношение

$$\text{rotrot } \delta = - j\omega\gamma\mu \delta. \qquad (3)$$

При условии, что плотность тока на входе и выходе любого участка рассматриваемого проводника остается постоянной, по правилам векторного анализа можно записать

$$\text{rotrot } \delta = - \Delta \delta, \qquad (4)$$

где Δ - оператор Лапласа.

Из соотношений (3) и (4) получено уравнение $\Delta\delta = j\omega\gamma\mu\delta$. Далее, раскрывая оператор Δ в цилиндрической системе координат (зависимости от координат φ и z отсутствуют), приходим к уравнению Бесселя для комплексной переменной δ(r)

$$d^2\delta/dr^2 + (1/r)(d\delta/dr) + q^2\delta = 0 \quad , \quad (q^2 = -j\omega\gamma\mu) \qquad (5)$$

Решением уравнения является цилиндрическая функция J0(qr).

Из уравнения (5) после подстановки δ = (0,0,δz) и дифференцирования δZ по r, получено

$$d\delta z/dr = -AqJ1(qr). \qquad (6)$$

Используем закон полного тока $2\pi r H\varphi(r) = I(r)$ для силы тока I(r) внутри окружности радиуса r и $2\pi r H\varphi(a) = I(a)$ для силы тока I(a) внутри окружности радиуса «a».

Отношение токов

$$I(r)/I(a) = (r/a)[J1(qr)/J1(qa)]. \quad (7)$$

Расчёт по формуле (7) показывает, что на частоте 500 Гц в поверхностном слое стального проводника может быть сосредоточено более 90% всего тока. Отсюда следует, что при повышении частоты ток распространяется лишь в поверхностном слое проводника, а, следовательно, и измеренное сопротивление будет относиться лишь к поверхностному слою. Поскольку коррозия затрагивает только поверхностный слой болта, то можно сделать вывод: данный метод позволяет определить коррозионное состояние узла крепления оттяжек посредством пропускания через него тока высокой частоты и дальнейшего определения его электрического сопротивления.

Метод определения сопротивления анкерной петли основан на математической модели поверхностных стоячих волн и их использования для оценки состояния анкерных петель.

Основная идея метода заключается в том, что с помощью СВЧ генератора в анкерной петле формируется возбуждение поверхностной стоячей волны, фиксируемой в момент резонанса, когда по длине анкерной петли укладывается целое число полуволн. При этом величина затухания определяется степенью коррозии поверхностного слоя петли [1].

Анкерная петля в рассматриваемом случае представляет собой одиночный металлический проводник, по которому распространяется электрическая волна типа Е. Распространение этой волны вдоль металлического проводника приводит к тому, что ток проводимости, текущий по нему, не возвращается обратно по второму проводнику, как это имеет место в двухпроводной линии, а замыкается токами смещения в окружающем проводник пространстве. Волны других типов распространяются, в основном, радиально (Er), но имеют и небольшую коаксиальную составляющую.

При высокой проводимости анкерной петли поверхностная волна создает электромагнитное поле, занимающее пространство вокруг проводника (петли). По мере уменьшения проводимости (вследствие коррозии) напряженность поля внутри проводника возрастает. В нашем случае, поле концентрируется в небольшом пространстве вокруг петли, а интенсивность затухания возрастает из-за потерь в слое диэлектрика (продукты коррозии). Чем толще слой диэлектрика, тем интенсивней затухание.

Для практических расчетов коэффициента затухания может быть использована формула [1, 2]

$$\alpha_M = \frac{\pi}{\lambda} \frac{1}{0{,}5 + \ln(0{,}89 a_1 / x_0)} \quad , \quad (8)$$

где а1 – радиус проводника с коррозией,
х0 – граничное расстояние, определяемое из соотношения

$$x_0 = \sqrt{2}\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (\sigma \cdot z_g)^{\frac{1}{2}} \cdot tg\,\varphi/_2 \quad . \quad (9)$$

Из полученных соотношений следует, что величина затухания прямо пропорциональна толщине коррозионного слоя, а её изменение, с достаточной степенью точности, может быть определено только при высоких частотах. Кроме того, на высоких частотах наблюдается слабая зависимость затухания от радиуса анкерной петли. Чем больше затухание поверхностной волны в коррозионном слое (в диэлектрике), тем меньше ее проникновение в почву. Поверхностная волна как бы «прилипает» к металлу, что практически устраняет влияние грунта на результаты измерений затухания в коррозионном слое в реальных условиях.

Использование высокочастотной стоячей волны (2 ГГц), когда по длине болта укладывается целое число полуволн фиксированных в момент резонанса, позволяет

устранить взаимовлияние U-образных болтов и искусственных заземлителей при их монтаже с отклонением от проекта [3, 4].

Метод определения сопротивления на высокой частоте U-образных болтов базируется на той же математической модели, что и для анкерных петель. Так как коррозия затрагивает лишь поверхностные слои U-образного болта, то убыль сечения, а, следовательно, и возрастание сопротивления, могут быть надежно определены при использовании высокой частоты (с учетом «скин-эффекта»). При измерениях электрического сопротивления, в этом случае, целесообразно использовать Т-образные мостовые схемы, так как их особенностью являются высокая чувствительность в узких пределах параметров схемы и рабочих частот вблизи равновесия моста [предложение М.С. Микитинского (Израиль)]. Это исключает возможность плавной настройки и вызывает необходимость использования фиксированной частоты измерения. С учетом глубины проникновения измерительного тока в U-образный болт (5…10 мм) выбрана частота 1,6 Мгц.

Апробация метода измерения сопротивления на высокой частоте была проведена на разных высоковольтных линиях: напряжение 330 кВ (СтавропольЭнерго), 220 кВ («Кентау–Чемкент», ЮжКазЭнерго) [6]. Результаты измерений сопротивлений U–образных болтов диаметром 35 мм представлены в таблице 1.

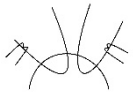
Таблица 1 – Экспериментальная оценка состояния U-образных болтов.

Измеряемый параметр U-образного болта	На складах	В полевых условиях	
		при отсутствии коррозии	при слабой коррозии
Сопротивление, Ом	1,52 ± 0,4	1,62 ± 0,55	3,86 ± 1,05

Полученные данные доказывают эффективность предложенного метода определения в реальных условиях. Из полученных результатов следует, что даже при слабой коррозии разница в измеренных сопротивлениях составляет 2,2 раза.

Апробация метода определения сопротивления анкерной петли с использованием поверхностной стоячей волны приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Экспериментальная оценка состояния анкерных петель.

Схема расположения U-образных болтов	Частота, f, мГц	Величина сигнала, мкВ		Отношение U_1/U_2
		Целая анкерная петля, U_1	Дефектная анкерная петля, U_2	
	1867	2328	9,96	233,7
	2590	2382	7,98	298,5
	2110	108,3	0,45	240
	2117	943,3	7,5	125,7

Из таблицы 2 следует, что разница величин сигналов, снимаемых с целой и дефектной петли лежит в диапазоне (50 – 300) раз. При этом непроектное расположение элементов анкерного узла не вызывает существенного изменения величины снимаемого сигнала.

Выводы:

– разработана математическая модель для определения степени опасности коррозии U-образных болтов, связывающая коррозию стали с её электрическим сопротивлением на переменном токе высокой частоты (1,6 МГц) с учётом скин-эффекта;

– разработана математическая модель для определения степени коррозии анкерной петли, связывающая коррозию со степенью затухания поверхностной электромагнитной волны (частотой порядка 2 ГГц) с учетом стоячей волны, фиксированной в момент резонансов, когда по длине анкерной петли укладывается целое число полуволн.

Список использованных источников

1. Кузнецов, А.Ю. Разработка метода оценки состояния оттяжек опор высоковольтных линий в электроэнергетических системах / Б.В.Палагушкин, Ю.В.Демин, Е.Г.Алаев, А.Ю.Кузнецов // Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. – 2015. – №3. – С.126 – 128.

2. Кузнецов, А.Ю. Распределение токов коррозии в заземляющих системах опор с оттяжками воздушных линий электропередач / [А.Ю.Кузнецов, Ю.В.Дёмин, Е.Г.Алаев и др.] // Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. – 2011. – №2. – С.215 – 218.

3. Кузнецов, А.Ю. Влияние конструктивных особенностей опор высоковольтных линий с оттяжками на степень опасности коррозии анкерного узла / [А.Ю.Кузнецов, Ю.В.Дёмин и др.] // Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. – 2011. – №2. – С.209 – 212.

4. Кузнецов, А.Ю. Экспериментальная проверка методов оценки состояния узлов крепления оттяжек опор воздушных линий в электроэнергетических системах / А.Ю.Кузнецов // Науч. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. – 2015. – №3. – С.121 – 123.